

地下水名著译丛



Physical and Chemical Hydrogeology  
(Second Edition)

# 物理与化学水文地质学

(第二版)

[美] Patrick A. Domenico Franklin W. Schwartz 著  
王焰新 等译



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

地下水名著译丛

# Physical and Chemical Hydrogeology

(Second Edition)

## 物理与化学水文地质学

(第二版)

Wuli yu Huaxue Shuiwen Dizhixue

[美]Patrick A. Domenico [美]Franklin W. Schwartz 著

王焰新 等译



高等教育出版社·北京  
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

图字:01-2010-2228号

Physical and Chemical Hydrogeology, 2<sup>nd</sup> Edition, by

Patrick A. Domenico and Franklin W. Schwartz

Copyright © 1990, 1998 John Wiley & Sons, Inc.

All Rights Reserved. This translation published under license.

### 图书在版编目(CIP)数据

物理与化学水文地质学(第二版)/(美)多美尼克  
(Domenico, P. A.), (美)施瓦茨(Schwartz, F. W.)著;  
王焰新等译. —北京:高等教育出版社, 2013. 1

(地下水名著译丛)

书名原文: Physical and Chemical Hydrogeology,  
Second Edition

ISBN 978-7-04-032230-9

I. ①物… II. ①多…②施…③王… III. ①水文  
地质学-高等学校-教材 IV. ①P641

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第257281号

策划编辑 陈正雄      责任编辑 陈正雄      封面设计 张楠      版式设计 于婕  
插图绘制 尹莉      责任校对 金辉      责任印制 张福涛

出版发行 高等教育出版社  
社址 北京市西城区德外大街4号  
邮政编码 100120  
印刷 北京市白帆印务有限公司  
开本 787mm × 1092mm 1/16  
印张 43.25  
字数 990千字  
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598  
网址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landaco.com>  
<http://www.landaco.com.cn>  
版次 2013年1月第1版  
印次 2013年1月第1次印刷  
定价 99.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换  
版权所有 侵权必究  
物料号 32230-00  
审图号 GS(2012)735号

水文地质学是研究地下水的科学,是以地质学理论为基础,研究岩石圈、水圈、大气圈、生物圈和人类圈耦合作用下,地下水系统结构、组成和地下水水量、水质的时空变化规律,并研究如何运用这些规律兴利避害,以确保供水安全和资源可持续开发利用,为地质环境保护提供理论和方法支撑的一门学科。水文地质学是20世纪中叶以来国际地球科学和环境科学发展最为迅猛的核心基础学科之一。这一学科的进步,极大地丰富了人类对于地球这个“水球”的认识。地下水的形成与演化受地球系统中各种物理、化学、生物作用的制约,同时,地下水积极参与地球系统的演化和地球物质循环与能量交换,导致巨量的物质破坏、迁移、富集,形成矿产和地热资源。作为全球水循环的重要环节,地下水是全球变化的受体和信息载体,地下水及其沉积物的物理、化学指标,诸如地下水水位、宏量组分、微量组分、同位素、惰性气体等可以示踪不同时空尺度上的环境变化。地下水与地表水相互转换,其间的水和溶质运移是制约地下水供水功能、生态功能和环境功能的重要过程,撇开水资源系统的整体分析,孤立地研究地表水或地下水,正确评价与科学管理水资源就无从谈起。此外,值得关注的是近年来水文地质学与微生物学的结合,这一交叉领域的快速发展,有望催生地球生物学(geobiology)研究的重大科学突破。

地下水对于经济社会可持续发展至关重要。地下水不但是重要的水资源,也是影响人类生存环境的关键因子。水文地质学在解决人类面临的资源与能源短缺、环境污染、地质灾害频发、生态环境恶化、气候变化、危险废物和温室气体地质处置等诸多问题中发挥着越来越重要的作用。经济建设和社会发展中大量的理论与实际问题需要水文地质专业人员开展深入研究和咨询服务。随着经济社会发展对水资源需求的不断增加,地下水资源和环境问题将会更加突出,对该领域的人才需求将更加迫切。

1950年以来,新中国建立了较为完善的水文地质专业课程体系。自1952年至1978年,中国水文地质专业的人才培养体系基本采用苏联的相应专业和课程体系。20世纪60年代以前的教材大都从苏联引进。70年代开始,中国学者开始较多地了解美国、欧洲和日本的水文地质教育和科学研究方面的动态,并及时在教材建设方面得到体现,尤其是80年代,集中出版了一批水文地质专业教材,基本满足了当时和其后的时期的人才培养和科研、生产需要。

“他山之石,可以攻玉”。本书是美国大学高年级本科生或研究生水文地质专业课程教材。为让国内水文地质学界系统了解甚至在学习中直接使用美国水文地质学教

材,受高等教育出版社委托,我组织中国地质大学(武汉)环境学院的部分青年教师一起承担了本书的翻译工作。第1章和第2章由甘义群翻译,第3章、第4章和第8章由文章翻译,第5章和第7章由孙自永翻译,第6章、第9章和第18章由马瑞、黄丽翻译,第10章和第14章由周瑜翻译,第11章和第12章由谢先军翻译,第13章由谢作明翻译,第15章和第16章由成建梅翻译,第19章由苏春利翻译,第17章、第20章和第21章由罗泽娇翻译。习题答案、三个附录和索引由孙自永翻译。孙自永还校改了部分章节。全书最后由王焰新统改、定稿并作此序。在翻译和定稿中,我们修正了原书中一些明显的错误,必要处还补充了“译者注”,以便使读者更好地理解有关概念;我们力求用词和语句的“原汁原味”,以便中国读者能够体会、了解原文的用词和写作风格。但跨文化的翻译极具挑战,没有最好,只有更好。我们期待着广大读者对译著的批评指正。

译者谨记,2011年12月29日,南望山麓

## 序 言

---

写作《物理与化学水文地质学》这本书第二版的一个主要目的是综合反映本学科领域新的、有广泛基础的显著科学进展。这方面值得一提的包括：地下水微生物学的新知识，与 NAPLs 和 DNAPLs 污染以及一般的多相流体污染有关的理论与实践知识，场地净化的新策略，作为污染场地决策工具的风险评价。然而，我们并未因为介绍这些新概念而牺牲构成水文地质学内核（无论是传统的还是现代的）的其他核心知识。与第一版一样，多孔介质中流体、能量和质量输运仍然为贯穿全书的主线。此外，第二版保留了原书以过程为导向的重点，并继续强调理论与实践的关系。在解释复杂的水文地质问题时，我们还是试图深入浅出。结果与第一版一样，本书包括了大量的实例，多数章节留有习题。本书的读者对象还是高年级本科生和研究生。

同事们有关原书中内容合适与否的建议和批评，在第二版中也得到反映。对一些内容的重新组织，显然是为了使得每一章尽可能自成体系。与第一版一样，本书有意包括了比一个单一课程多的内容，以便教师做出选择。我们希望这种重新组织使得选择来得容易些。

我们感谢加拿大 McMaster 大学的 Stephen Worthington 博士和已过世的 Jim Quinlan 做出的特殊贡献。他们帮助我们写作第 2 章和第 16 章有关岩溶的内容。同所有教授一样，我们受益于现在和从前学生的不断帮助和协助。Hubao Zhang 博士通过增加附在本书后背的计算机软件 WELLS，扩展了我们关于井水力学的内容。Dea-Ha Lee 博士和 Abe Springer 博士评阅了第 7 章，Springer 博士还提供了他在美国俄亥俄州研究场地的 MODFLOW 数据。Rob Schincariol 博士友情提供了第 10 章中计算机生成的水力传导系数场的资料。Alan Fryar 博士贡献了 16.4 节关于自组织系统的素材。Gordon McClymont 给予风险评价部分内容的写作以灵感，并与 Hubao Zhang 一起帮助评阅了这部分内容。John Wiley & Sons 公司的编辑支持极大，其工作使得本书排版现代化。

Patrick A. Domenico  
Franklin W. Schwartz



---

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 什么是水文地质学? .....	1
1.1.1 20 世纪 40 年代早期之前的物理水文地质学 .....	2
1.1.2 20 世纪 60 年代之前的化学水文地质学 .....	4
1.1.3 1960 年之后的水文地质学 .....	4
1.2 水文地质学与其他地质学科的关系 .....	5
1.3 水文循环 .....	6
1.3.1 水文循环的组成部分 .....	6
1.3.2 蒸散作用及潜在蒸散作用 .....	8
1.3.3 入渗和补给 .....	10
1.3.4 基流 .....	10
1.3.5 水均衡方程 .....	12
习题 .....	15
<b>第 2 章 孔隙度和渗透性的起源</b> .....	16
2.1 孔隙度和渗透性 .....	16
2.1.1 孔隙度和有效孔隙度 .....	16
2.1.2 渗透性 .....	19
2.2 大陆环境 .....	20
2.2.1 风化作用 .....	20
2.2.2 侵蚀、搬运和沉积 .....	22
冲积物 .....	22
风积物 .....	24
湖泊沉积物 .....	25
冰川沉积物 .....	25
2.3 大陆环境与海洋环境的边界 .....	25
2.4 海洋环境 .....	26
2.4.1 侧向地层序列和垂直地层序列 .....	27
2.4.2 古海洋及其沉积物 .....	28

古生代岩组 .....	29
中生代岩组 .....	29
新生代岩组 .....	30
2.4.3 海洋环境中的成岩作用 .....	30
孔隙度减小:压实和压溶 .....	30
岩石-水的化学相互作用:砂岩中的次生孔隙 .....	32
2.5 地壳隆起、成岩作用及侵蚀作用 .....	33
2.5.1 与隆起有关的不同建造类型 .....	34
2.5.2 碳酸盐岩中次生孔隙富集 .....	36
2.6 构造活动与裂隙的形成 .....	36
2.6.1 裂隙作用样式 .....	37
2.6.2 流体压力和孔隙度 .....	38
2.6.3 连通性 .....	39
<b>第3章 地下水运动 .....</b>	<b>40</b>
3.1 达西实验与野外拓展 .....	40
3.1.1 达西流速的实质 .....	41
3.1.2 水头:Hubbert 势 .....	42
3.1.3 梯度与地下水流 .....	43
3.1.4 达西公式中比例系数的物理意义 .....	45
3.1.5 单位与量纲 .....	46
3.2 地质介质的水力传导系数与渗透率 .....	46
3.2.1 水力传导系数的实测范围 .....	46
3.2.2 水力传导系数的分布特征 .....	48
3.2.3 单元内的各向异性与非均质性 .....	49
3.2.4 单元间的非均质性与含水层分类 .....	51
3.2.5 求取水力传导系数均值 .....	52
3.2.6 各向异性介质中的达西定律 .....	53
3.2.7 水力传导系数的测定 .....	55
实验室测定 .....	55
经验公式 .....	56
3.3 地质系统渗流图的测绘 .....	57
3.3.1 水文地质剖面 .....	57
3.3.2 等势面与潜水面图 .....	58
3.3.3 小结 .....	60
3.4 裂隙岩石中的渗流 .....	61
3.4.1 流体流动的连续性方法 .....	61
粒间多孔介质 .....	61
裂隙岩石 .....	62



3.5 非饱和带中的渗流 .....	65
3.5.1 水头与压力水头 .....	65
3.5.2 水分特征曲线 .....	66
3.5.3 不同饱和程度水流中达西定律的应用 .....	68
3.5.4 裂隙岩层中的非饱和水流 .....	68
习题 .....	69
<b>第4章 水流基本方程、边界条件及流网</b> .....	<b>73</b>
4.1 地下水流方程构建 .....	73
4.2 流体质量守恒 .....	74
4.2.1 水流基本方程 .....	75
4.3 多孔介质的储水性质 .....	77
4.3.1 水的压缩性及其与承压含水层弹性储水的关系 .....	78
4.3.2 岩石介质的压缩性:有效应力理论 .....	80
4.3.3 介质的压缩性及其与承压含水层单位储水系数的关系 .....	82
4.3.4 含水层的承压水流方程 .....	84
4.3.5 含水层的重力给水度 .....	85
4.4 边界条件与流网 .....	86
4.4.1 流网的绘制 .....	90
4.5 量纲分析 .....	91
习题 .....	92
<b>第5章 盆地水文循环中的地下水</b> .....	<b>94</b>
5.1 地形驱动力 .....	94
5.1.1 早期的野外研究 .....	94
5.1.2 非承压地下径流的概念模型、图解模型和数学模型 .....	95
盆地几何形态对地下水径流的影响 .....	98
盆地地质背景对地下水径流的影响 .....	100
5.1.3 山区的地下水 .....	104
5.1.4 碳酸盐岩区的地下水 .....	109
5.1.5 滨海地区的地下水 .....	110
5.1.6 滨海地区的咸-淡水分界面 .....	111
Ghyben - Herzberg 关系式 .....	112
淡水排泄断面位于海面之下时咸-淡水分界面的形状 .....	113
5.1.7 抽水井附近咸-淡水分界面的锥形上升 .....	114
5.2 地下水径流的地表特征 .....	114
5.2.1 补给-排泄关系 .....	115
5.2.2 地下水-湖泊相互作用 .....	119
5.2.3 地下水-地表水相互作用 .....	121
5.3 地形驱动的地下水系统的工程和地质学意义 .....	121

5.3.1 大型水库蓄水	121
5.3.2 开挖物:涌水量及稳定性	122
海平面运河	122
地下水涌入开挖物内的量	124
地下水排泄区内开挖物的稳定性	125
5.3.3 滑坡和边坡稳定性	126
习题	128
<b>第6章 水力学试验:模型、方法与应用</b>	<b>129</b>
6.1 水力学试验的地质模型原型	129
6.2 常规水力学试验方法和分析	131
6.2.1 泰斯非稳定井流抽水试验方法	131
配线法	134
假设及解译	135
6.2.2 非稳定井流方程的修正	135
时间-降深法	136
距离-降深法	136
6.2.3 稳态:瞬态响应的终端情况	137
6.2.4 越流含水层中的 Hantush - Jacob 求解法	138
6.2.5 潜水含水层	141
6.3 单井试验	143
6.3.1 水位恢复试验	143
6.3.2 钻杆试验	144
6.3.3 定容积瞬时抽(注)水试验	144
6.3.4 抽水井响应:单位流量与井效	146
6.4 非完整井、叠加和有界含水层	148
6.4.1 非完整井	148
6.4.2 叠加原理	149
6.4.3 有界含水层	151
6.5 裂隙岩体或低渗透性岩体中的水力学试验	155
6.5.1 单孔试验	155
6.5.2 多孔试验	156
6.6 水力学问题的应用实例	158
6.6.1 滤管直径与抽水流量	158
6.6.2 井的产水量:分段降深试验	158
6.6.3 一例含水层疏干排水问题	159
6.6.4 一例供水问题	161
6.7 计算机运算	162
6.7.1 代码示范	164

6.7.2 有界含水层回访 .....	165
习题 .....	167
<b>第7章 作为资源的地下水</b> .....	<b>171</b>
7.1 地下水资源的开发 .....	171
7.1.1 含水层对抽水的响应 .....	171
7.1.2 抽水量分析 .....	172
案例分析:洛杉矶河上游地区 .....	172
7.1.3 管理策略 .....	174
人工补给 .....	175
联合利用 .....	177
7.2 地下水流模拟概述 .....	178
7.2.1 建模的一般步骤 .....	179
7.2.2 概念模型 .....	179
7.2.3 地下水流模拟 .....	180
7.2.4 模型结果评估 .....	181
7.2.5 模型验证 .....	182
7.2.6 注意事项 .....	182
7.3 地下水流有限差分方程的构建 .....	183
7.3.1 有限差分网格的描述 .....	183
7.3.2 有限差分方程的推导 .....	184
7.4 MODFLOW 软件家族 .....	186
7.4.1 有限差分方程组的求解 .....	187
7.4.2 模块化程序结构 .....	188
7.4.3 示例 .....	189
7.4.4 软件的操作要点 .....	193
时间步长的大小 .....	193
“抽水”节点处的降深 .....	193
地下水位条件 .....	194
边界条件 .....	195
7.5 MODFLOW 应用案例 .....	195
7.5.1 模型的构建 .....	197
7.5.2 数据准备及模型校准 .....	199
习题 .....	200
<b>第8章 应力、应变和孔隙流体</b> .....	<b>202</b>
8.1 变形多孔介质 .....	202
8.1.1 一维固结 .....	202
渗流方程的建立 .....	202
不排水条件下地下水位对自然荷载事件的响应 .....	203

水位对自然荷载事件的排水响应 .....	207
8.1.2 一维排水响应造成的地面沉降 .....	208
地面沉降的数学描述 .....	210
8.1.3 三维固结 .....	217
变形问题中的弹性特性 .....	217
变形介质的流动方程 .....	219
8.2 活跃沉积环境中的异常流体压力 .....	220
8.2.1 起源和分布 .....	220
8.2.2 问题的数学表达式 .....	223
8.2.3 等温盆地荷载和构造应变 .....	224
一维盆地荷载 .....	225
一维荷载模型的扩展 .....	228
8.2.4 流体的热膨胀 .....	230
8.2.5 流体压力和岩石裂隙 .....	233
8.2.6 相变 .....	236
8.2.7 异常低压 .....	237
8.2.8 不可逆过程 .....	237
8.3 构造作用中的孔隙流体 .....	238
8.3.1 液体压力和逆冲断层的作用 .....	238
8.3.2 流体注入引起的地震活动 .....	239
8.3.3 水库附近诱发的地震活动 .....	241
8.3.4 地壳中部的地震活动和孔隙流体 .....	242
8.3.5 地下水测震仪:地震和膨胀模型 .....	242
习题 .....	244
<b>第9章 地下水流中的热运移 .....</b>	<b>246</b>
9.1 传导、对流和热运移方程 .....	246
9.1.1 傅里叶定律 .....	247
9.1.2 对流运移 .....	249
9.1.3 能量运移公式 .....	250
热传导方程 .....	251
传导-对流方程 .....	252
无量纲参数 .....	253
9.2 强迫对流 .....	253
9.2.1 温度剖面和地下水流速 .....	254
9.2.2 区域地下水流的热运移 .....	255
9.2.3 活跃的沉积环境中的热运移 .....	262
9.2.4 山区的热运移 .....	265
9.3 自由对流 .....	267

9.3.1 自由对流的起始条件 .....	267
9.3.2 倾斜地层 .....	268
9.3.3 地质意义 .....	269
9.4 能源资源 .....	270
9.4.1 地热能源 .....	270
9.4.2 含水层中的能量储存 .....	271
9.5 热运移和核废物储存的地质贮藏处 .....	271
9.5.1 核废物处置项目 .....	271
9.5.2 岩石类型 .....	272
9.5.3 热-水化学效应 .....	275
9.5.4 热-机械效应 .....	275
习题 .....	276
<b>第 10 章 溶质运移 .....</b>	<b>277</b>
10.1 对流 .....	278
10.2 弥散的基本概念 .....	279
10.2.1 扩散 .....	280
10.2.2 机械弥散 .....	282
10.3 弥散系数的特征 .....	284
10.3.1 微观尺度的研究 .....	284
10.3.2 作为介质特性的弥散度 .....	285
10.3.3 宏观及更大尺度上的研究 .....	285
10.4 弥散的非克模型 .....	289
10.5 裂隙介质中的混合作用 .....	292
10.6 弥散的地统计学模拟 .....	294
10.6.1 均值和方差 .....	295
10.6.2 自协方差和自相关函数 .....	295
10.6.3 相关随机场的产生 .....	297
10.6.4 弥散度的估算 .....	298
10.7 示踪剂和示踪试验 .....	299
10.7.1 野外示踪试验 .....	299
自然梯度试验 .....	299
单井脉冲试验 .....	300
双井示踪试验 .....	300
具有多个观测井的单井注水或抽水 .....	301
10.7.2 基于污染羽和环境示踪剂的估算 .....	301
10.7.3 高密观测场地示踪试验 .....	301
Borden 示踪试验 .....	302
弥散随机模型的验证 .....	303

习题 .....	304
<b>第 11 章 水文地球化学原理 .....</b>	<b>307</b>
11.1 水系统简介 .....	307
11.1.1 浓度度量单位 .....	308
11.1.2 气相与固相 .....	309
11.2 水的结构与水中的物质 .....	310
11.3 反应的平衡与动力学描述 .....	310
11.3.1 反应速率 .....	311
11.4 化学反应的平衡模型 .....	312
11.4.1 活度模型 .....	312
11.5 化学平衡的偏离 .....	315
11.6 化学反应动力学 .....	316
11.7 有机组分 .....	318
11.8 地下水组成 .....	321
11.8.1 常规水分析 .....	322
11.8.2 专项分析 .....	323
11.9 化学数据的描述 .....	324
11.9.1 丰度或相对丰度 .....	324
11.9.2 丰度及其变化方式 .....	325
习题 .....	328
<b>第 12 章 化学反应 .....</b>	<b>330</b>
12.1 酸-碱反应 .....	330
12.1.1 天然弱酸-碱系统 .....	331
12.1.2 $\text{CO}_2$ -水系统 .....	332
12.1.3 碱度 .....	333
12.2 溶解、出溶、挥发与沉淀 .....	334
12.2.1 气体的溶解与出溶 .....	334
12.2.2 水中有机溶质的溶解 .....	335
12.2.3 挥发作用 .....	336
12.2.4 固体的溶解与沉淀 .....	339
12.2.5 固体的溶解度 .....	339
12.3 络合反应 .....	340
12.3.1 络合物的稳定性及形态模拟 .....	341
12.3.2 主要离子的络合与平衡计算 .....	343
12.3.3 增强金属离子的迁移性 .....	343
12.3.4 有机络合反应 .....	344
12.4 表面反应 .....	345
12.4.1 等温吸附曲线 .....	345

12.4.2	有机组分的疏水吸附	346
12.4.3	基于 $K_d$ 的模拟金属元素吸附的方法	350
12.4.4	多参数平衡模型	350
12.5	氧化-还原反应	354
12.5.1	氧化数、半反应、电子活度及氧化还原电位	355
12.5.2	反应动力学与优势反应对	359
12.5.3	金属迁移能力的控制	360
12.5.4	有机组分的生物转化	361
12.6	水解作用	362
12.7	同位素过程	362
12.7.1	放射性衰变	363
12.7.2	同位素反应	364
12.7.3	氘和氧-18	365
	习题	367
<b>第 13 章</b>	<b>胶体与微生物</b>	369
13.1	胶体运输概念模型	369
13.1.1	胶体物质的分布	370
13.1.2	稳定作用	370
13.1.3	输运与过滤	371
13.2	地下水中的胶体输运	372
13.2.1	采样与测试	372
13.2.2	科德角研究	373
13.3	微生物系统	374
13.3.1	生物膜	375
13.3.2	微生物群落采样与计数	376
	平板计数	376
	直接计数法	377
	生化技术	378
13.3.3	微生物反应速率	378
13.3.4	地下微生物生态	380
13.4	微生物过程	381
13.4.1	生物降解	381
13.4.2	生物膜动力学	382
13.5	常见污染物的生物转化	383
13.5.1	烃类及衍生物	384
13.5.2	卤代脂肪族化合物	384
13.5.3	卤代芳香族化合物	385
13.5.4	多氯联苯	385



13.5.5 复杂的转化途径 .....	385
习题 .....	386
<b>第 14 章 溶质运移方程</b> .....	387
14.1 溶质运移方程 .....	387
14.1.1 扩散方程 .....	388
14.1.2 对流-扩散方程 .....	388
14.1.3 对流-弥散方程 .....	389
14.2 溶质反应运移 .....	389
14.2.1 一级动力学反应 .....	390
14.2.2 平衡吸附反应 .....	391
14.2.3 非均相动力学反应 .....	392
14.3 边界条件和初始条件 .....	393
习题 .....	395
<b>第 15 章 天然地下水系统中的溶质运移</b> .....	396
15.1 引起化学变化的混合作用 .....	396
15.1.1 大气降水与原生沉积水的混合作用 .....	396
15.1.2 深部沉积环境中的扩散 .....	398
15.2 非饱和带中的化学反应 .....	400
15.2.1 气体溶解与重分布 .....	400
15.2.2 弱酸-强碱反应 .....	401
15.2.3 硫化物的氧化 .....	404
15.2.4 石膏的沉淀与溶解 .....	404
15.2.5 阳离子交换 .....	404
15.2.6 有机反应 .....	405
15.3 饱和带中的化学反应 .....	405
15.3.1 弱酸-强碱反应 .....	406
15.3.2 可溶盐的溶解 .....	409
15.3.3 氧化-还原反应 .....	410
15.3.4 阳离子交换 .....	413
15.4 Milk 河含水层实例研究 .....	414
15.5 地下水定年 .....	418
15.5.1 直接法 .....	418
氚 .....	419
碳-14 .....	420
氯-36 .....	422
15.5.2 间接法 .....	423
$\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta\text{D}$ .....	423
氯氟烃 .....	423

习题 .....	425
<b>第 16 章 地下水流中的质量运输:地质系统</b> .....	427
16.1 碳酸盐岩中的质量运输 .....	427
16.1.1 碳酸盐沉积物中趋于化学平衡的途径 .....	428
16.1.2 未饱和问题 .....	431
16.1.3 白云石化作用 .....	432
16.2 成矿作用 .....	434
16.2.1 矿床的成因 .....	434
卷积带前锋型铀矿床 .....	435
密西西比河谷型铅锌矿 .....	435
非商业矿化作用:盐渍土和蒸发岩 .....	441
16.3 烃的运移与圈闭 .....	443
16.3.1 驱替与圈闭 .....	443
16.3.2 盆地迁移模型 .....	445
16.4 水文地质系统中的自组织 .....	447
16.4.1 与溶解相关的有序化 .....	447
16.4.2 与沉淀和混合现象相关的有序化 .....	448
习题 .....	449
<b>第 17 章 污染物水文地质学概论</b> .....	450
17.1 地下水污染源 .....	451
17.1.1 放射性核素污染 .....	456
17.1.2 微量金属 .....	456
17.1.3 营养物质 .....	457
17.1.4 其他无机成分 .....	457
17.1.5 有机污染物 .....	458
石油烃及其衍生物 .....	458
卤代脂肪族化合物 .....	461
卤代芳香族化合物 .....	461
多氯联苯 .....	462
健康影响 .....	462
17.1.6 生物污染物 .....	462
17.2 溶质羽对于过程的指示作用 .....	462
17.2.1 裂隙和岩溶系统 .....	467
17.2.2 纽约 Babylon 案例研究 .....	468
17.2.3 俄勒冈州 Alkali 湖案例分析 .....	470
17.3 溶质采样设计和质量保证问题 .....	472
17.3.1 采样网络设计 .....	472
17.3.2 化学数据质量保证 .....	473